

МОДИФИЦИРОВАНИЕ БОРОМ ЛИТОЙ БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ

В. Т. СВИЩЕНКО

1. Введение

Литой режущий инструмент находит все более широкое применение в промышленности. На многих заводах литой инструмент применяется в течение ряда лет.

Многими исследованиями (проведенными Лебедевым Т. А., Добровидовым А. Н., Розенбергом А. М., Ревисом И. А., Казеевым С. А., Ермошкиным Л. П. и другими советскими учеными) выяснен ряд теоретических и практических вопросов применения литого инструмента: экономические преимущества, режущие свойства, технология изготовления, оптимальные химические составы, оптимальная термическая обработка и т. д.

Преимущества применения литого инструмента заключаются, во-первых, в экономии дорогостоящей быстрорежущей стали, во-вторых, в сокращении и удешевлении цикла изготовления инструмента и, в-третьих, в возможности использования для переплавки отходов и изношенного инструмента из быстрорежущей стали.

Следует еще добавить, что литой инструмент имеет повышенную стойкость на многих операциях по сравнению с стойкостью инструмента из кованой стали.

Однако литой инструмент имеет и весьма существенные недостатки по сравнению с кованым инструментом.

К этим недостаткам относится прежде всего повышенная хрупкость литого инструмента, затрудняющая практическое использование его во многих случаях. Вторым существенным недостатком является неравномерность режущих свойств литого инструмента при работе его по разным сталям. Стойкость литого инструмента резко снижается с увеличением вязкости обрабатываемого металла, причем наибольшее снижение стойкости наблюдается при работе с ударной нагрузкой (фрезеровании). Можно считать установленным, что литой инструмент на фрезерных операциях работает лучше кованого по относительно хрупким сталям типа ШХ—15 и намного хуже кованого по относительно вязким сталям типа ст. 45, ст. 30ХГСА. Указанные недостатки затрудняют массовое внедрение литого инструмента в производство, поэтому устранение этих недостатков является весьма важной практической задачей. Как уже отмечалось, над проблемой литого инструмента работают многие исследователи. Большая научно-исследовательская работа по литому инструменту в течение ряда лет проводится на кафедре металловедения Томского политехнического института под руководством профессора-доктора А. Н. Добровидова.

Следует отметить, что везде, за исключением Томского политехнического института, инструмент отливается в керамические сухие формы.

В Томском политехническом институте разработан и осуществлен в производственных масштабах способ отливки режущего инструмента в металли-

ческие вращающиеся формы, т. е. под давлением. Преимущества этого способа заключаются, во-первых, в большой производительности процесса, во-вторых, в дальнейшем сокращении цикла изготовления инструмента, так как отлитый в кокиль инструмент из быстрорежущей стали закаливается в процессе остывания отливки, и термообработка инструмента заключается только в 3-кратном отпуске.

Когда закалка происходит в процессе остывания отливки, т. е. с максимально возможной температуры, в твердый раствор (аустенит) переходит большее количество легирующих элементов, чем обычно, в результате чего повышается режущая способность литого инструмента. Это является третьим весьма существенным преимуществом способа отливки инструмента в кокиль.

Настоящее исследование является частью общей работы по литому инструменту, проводимой на кафедре. Исследование предпринято с целью улучшения режущих свойств литой быстрорежущей стали путем воздействия на структуру первичной кристаллизации стали модифицированием. В работе главным образом исследовано влияние малых добавок бора на свойства литой быстрорежущей стали с различным содержанием вольфрама. Изучались следующие вопросы:

1. Влияние бора на измельчение структуры литой стали.
2. Влияние бора на режущие свойства литой стали.
3. Влияние бора на изменение микротвердости отдельных структурных составляющих литой стали (темной составляющей, светлой составляющей и сетки карбидной эвтектики).
4. Влияние бора на изменение количества и состава структурных составляющих литой стали.

Попутно исследовалось влияние изменения содержания вольфрама на структуру и режущие свойства литой быстрорежущей стали; проведено небольшое исследование влияния изменения геометрии режущей части на стойкость литых ножей к сборным торцевым фрезам.

Предполагалось, что модифицирование бором повысит вязкость и режущие свойства литой быстрорежущей стали и даст возможность успешного применения литого инструмента на фрезерных работах по вязким сталям.

2. Отливка инструмента

Большая часть экспериментальной работы проведена на одном из заводов при организации кафедрой металловедения ТПИ производства литого инструмента на этом заводе. В качестве опытного инструмента отливались ножи к сборным торцевым и 3-сторонним фрезам двух размеров— $35 \times 24 \times 8,5$ и $23 \times 14 \times 6$. Сталь плавилась в бессердечниковой индукционной печи. Бор добавлялся (в количестве от 0,0017% до 0,053%) в виде ферробора или в виде комплексного сплава с бором в измельченном состоянии в последний момент плавки перед разливкой металла в формы.

Сталь предварительно раскислялась алюминием из расчета присадки 0,09% алюминия. При изготовлении плавов с добавкой бора в виде ферробора переплавлялся изношенный инструмент из стали марок РФ-1 и ЭИ-262.

Плавки с добавкой бора в виде комплексного сплава отливались только из стали марки РФ-1. Отливка производилась на центробежной машине с вертикальной осью вращения и регулируемым числом оборотов в металлические формы. Температура металла в момент заливки выдерживалась в пределах $1450-1500^{\circ}$. Контроль температуры жидкого металла осуществлялся при помощи оптического пирометра. Поверхность металла защищалась шлаком (обычным стеклом). Продолжительность плавки составляла 8—12 минут. Выгорание углерода компенсировалось добавкой „быстрорежущего чугуна“—науглероженной быстрорежущей стали. Ферробор изготовлялся нами в металлографической лаборатории ТПИ алюмино-термическим

методом и содержал 3% бора и 4—5% алюминия. Химический состав комплексного сплава с бором:

титан	—	15,44%
кремний	—	8,27%
марганец	—	6,83%
алюминий	—	15,68%
цирконий	—	2,63%
бор	—	1,3%
железо	—	остальное.

В таблицах 1—3 приведен химический состав плавов с добавкой бора в виде ферробора, в таблице 4 показано расчетное содержание бора в плавках с добавкой бора в виде комплексного сплава.

Таблица 1

Химический состав плавов с малым содержанием вольфрама (7,62÷12,60%)

Условное обозначение плавов	Содержание в %				Содерж. бора в % по анализу	Размер ножа
	углерод	хром	вольфрам	ванадий		
2	0,93	4,48	7,62	1,22	0,015	35×24×8,5
3	1,00	4,48	8,79	1,17	0,015	"
4	0,98	4,26	7,91	1,66	0,018	"
5	0,92	4,06	11,72	1,26	0,020	"
6	0,92	4,06	12,60	1,20	0,030	"

Таблица 2

Химический состав плавов с средним содержанием вольфрама (13,01÷15,85%)

Условное обозначение плавов	Содержание в %				Содерж. бора в % по анализу	Размер ножа
	углерод	хром	вольфрам	ванадий		
10	0,90	4,23	13,01	1,56	—	23×14×6
13	0,90	4,74	14,96	1,56	0,010	"
14	0,97	4,48	14,96	1,51	0,020	"
15	1,01	4,56	14,36	1,56	0,006	"
16	1,02	4,35	15,85	1,51	0,025	"
17	0,95	4,39	14,96	1,51	0,030	"

Таблица 3

Химический состав плавов с большим содержанием вольфрама (16,45—18,25%)

Условное обозначение плавов	Содержание в %				Содержание бора в % по анализу	Размер ножа
	углерод	хром	вольфрам	ванадий		
11	0,95	4,31	16,45	1,77	0,003	23×14×6
12	0,95	4,19	17,05	1,66	0,008	"
18	0,90	4,21	16,45	1,40	0,040	"
19	0,93	4,19	18,25	1,56	0,036	"
1	0,86	4,11	18,09	1,20	—	35×24×8,5
7	0,93	4,21	17,35	1,30	0,053	"

Таблица 4

Расчетное содержание бора в плавках с добавкой бора в виде комплексного сплава

Условное обозначение плавки	Содержание бора в % по синтезу	Общее количество добавки сплава в %	Размер ножа
1Г	0,0017	0,125	23×14×6
2Г	0,002	0,15	"
3Г	0,0065	0,5	"
4Г	0,0195	1,5	"
5Г	0,0325	2,5	"

Так как при отливке в кокиль инструмента из быстрорежущей стали закалка инструмента происходит в процессе остывания отливки, то термообработка литых ножей заключалась только в 3-кратном отпуске. Для литых ножей, модифицированных бором (и немодифицированных), был подобран следующий режим отпуска:

1-й отпуск при температуре	600°
2-й " "	620°
3-й " "	630°

Выдержка при температуре отпуска равнялась одному часу. Указанный режим отпуска обеспечивает получение нормальной твердости литых ножей в пределах 63—66 единиц по Роквеллу (R_c).

Ножи всех перечисленных в таблицах 1—4 плавки после термообработки испытывались резанием. Кроме перечисленных плавки, было отлито большое количество немодифицированных плавки ножей из быстрорежущей стали с различным содержанием вольфрама и примерно равным содержанием других легирующих элементов. Эти плавки были отлиты специально для изучения микроструктуры литой быстрорежущей стали с различным содержанием вольфрама и не испытывались резанием.

3. Испытания резанием

Испытания резанием ножей всех плавки проводились в лаборатории резания завода. Плавки ножей размером 23×14×6 с добавкой бора в виде ферробора испытывались также в производственных условиях в инструментальном цехе завода.

Лабораторные испытания проводились на торцевом фрезеровании однозубой фрезой по вязкой стали с временным сопротивлением 61 кг/мм² без охлаждения. Для каждого размера ножей были взяты нормативные режимы резания, принятые на заводе для соответствующего размера ножей из кованой стали.

Режим резания при испытании ножей размером 35×24×8,5: скорость резания—26,2 м/мин, глубина фрезерования 3 мм, подача на 1 зуб 0,26 мм.

Режим резания при испытании ножей размером 23×14×6: скорость резания—26,7 м/мин, глубина фрезерования 3 мм, подача на один зуб 0,18 мм.

Одновременно с испытанием литых ножей испытывались резанием ножи (размером 35×24×8,5) из кованой стали марки РФ-1.

За критерий притупления принимался износ по задней грани, равный 1,5 мм.

Главная наша задача заключалась в сравнении режущих свойств литой модифицированной бором стали с режущими свойствами литой немодифицированной стали при работе в одинаковых условиях. Сравнение стойкости

литых ножей с стойкостью ножей из ковanej стали являлось побочной задачей, поскольку это требовалось условиями внедрения литого инструмента на заводе. Теми же условиями внедрения был задан выбор материала для испытания и геометрия режущей части ножей из ковanej стали, которые испытывались с принятой на заводе геометрией, т. е. при существующих на заводе условиях эксплуатации ножей из ковanej стали.

Во время проведения испытаний резанием еще не была закончена работа в ЗСФАН по определению оптимальной геометрии для литого инструмента и инструмента из ковanej стали. Из этой работы нам было только известно, что геометрия режущей части литого инструмента должна быть отличной от геометрии режущей части инструмента из ковanej стали и что стойкость литого инструмента повышается с увеличением задних углов резания. С целью получения максимальной стойкости литых ножей, удовлетворяющей условию внедрения литого инструмента на заводе, нами было произведено небольшое исследование влияния на стойкость изменения (увеличения) задних углов резания. При этом установлено, что увеличение задних углов резания до значений, указанных в таблице 5 (геометрия, полученная из опыта), повышает стойкость литых ножей на 85—95%.

Таким образом для литых ножей была подобрана специальная геометрия, после чего ножи всех плавов испытывались с одной и той же (подобранной) геометрией режущей части.

Таблица 5

Геометрия режущей части сборных торцевых фрез с литыми ножами и ножами из ковanej стали

Геометрия режущей части	Параметры режущей части в градусах							
	задний угол по торцу	задний угол по цилиндру	задний угол по фаске	угол в плане	угол под внутрен. торца	передний угол по торцу	передний угол по цилиндру	фаска
Заводская для ковanych ножей	8	12	8	90	2	0	10	$2 \times 45^\circ$
Полученная из опыта для литых ножей	15	25	25	90	2	0	10	$2 \times 45^\circ$

Ножи размером $35 \times 24 \times 8,5$ испытывались как с геометрией, применяемой на заводе, так и с полученной из опыта. Ножи размером $23 \times 14 \times 6$ испытывались только с специальной геометрией.

Результаты лабораторных испытаний ножей приведены в таблицах 6—8. Значения стойкости, приведенные в таблицах 6—8, получены как средние из нескольких испытаний ножей одной и той же плавки. В таблице 6 показана стойкость литых ножей размером $35 \times 24 \times 8,5$ модифицированных плавов с малым содержанием вольфрама (7,62—12,60%), а также плавки № 1 без бора, плавки № 7 и ножей из ковanej стали. В нашем распоряжении не оказалось испытанной резанием плавки ножей размером $35 \times 24 \times 8,5$ без бора с малым содержанием вольфрама, поэтому стойкость ножей модифицированных плавов с малым содержанием вольфрама сравнивается со стойкостью немодифицированной плавки № 1 с содержанием 18,09% вольфрама. Повидимому, при этом допускается небольшая ошибка, так как ножи немодифицированной плавки № 10, химический состав которой очень близок к оптимальному составу литых немодифицированных быстрорежущих сталей для ножей торцевых фрез (1. С содержанием 0,62—0,85% углерода и 10—13% вольфрама и 2. С содержанием 1% углерода и 15% вольфрама—по

данным ЗСФАН), имеют стойкость, примерно равную стойкости ножей плавки № 1. Уменьшение запаса прочности ножей плавки № 10, имеющих меньший размер ($23 \times 14 \times 6$), чем ножи плавки № 1 ($35 \times 24 \times 8,5$), компенсировано уменьшением режима резания для ножей меньшего размера.

Таблица 6

Стойкость ножей размером $35 \times 24 \times 8,5$

Обознач. плавки	Содерж. в %		Геометрия	Стойкость в минутах	Относительн. стойкость литых ножей. За 100% принята стойкость ножей	
	вольфрама	бора по анализу			плавки № 1	из ковальной стали
Кован.			Заводская	240		100
1	18,09		Заводская			27.5
2	7,62	0,015	Специальн. Заводская	130	100	54
3	8,79	0,015	Специальн. Заводская	400	308	86
4	7,91	0,018	Специальн. Заводская	410	815	166
5	11,72	0,020	Специальн. Заводская	345	265	88
6	12,60	0,030	Специальн. Заводская	322	248	170
7	17,35	0,053	Специальн. Специальн.	275	212	72
				120	92	144
						69
						134
						59
						114

Таблица 7

Стойкость литых ножей размером $23 \times 14 \times 6$ плавки с содержанием $13,0 \div 15,85\%$ вольфрама, испытанных с специальной геометрией

Обозначение плавки	Содержание в процентах		Стойкость в минутах	Относительн. стойкость в %
	вольфрама	бора по анализу		
10	13,01	—	120	100
13	14,96	0,010	360	300
14	14,96	0,020	432	377
15	14,36	0,006	228	190
16	15,85	0,025	348	290
17	14,96	0,030	192	160

Данные, приведенные в таблицах 6—8, показывают, что добавка бора в количестве от 0,01% до 0,025% приводит к резкому повышению стойкости литых ножей из быстрорежущей стали с различным содержанием вольфрама. Стойкость снижается при добавке больших (чем указано) количеств бора. Стойкость литых ножей плавки, модифицированных оптимальным количеством бора (в виде ферробора), увеличивается в 3—4 раза по сравнению с стойкостью ножей немодифицированных плавки.

Таблица 8

Стойкость литых ножей размером $23 \times 14 \times 6$ плавков с содержанием 16,45÷18,25 % вольфрама, испытанных со специальной геометрией

Обозначение плавков	Содержание в %		Стойкость в минутах	Относит. стойк. (За 100% принята стойкость плавки № 10 (см. табл. 7))
	вольфрама	бора по анализу		
11	16,45	0,003	228	190
12	17,05	0,008	264	220
18	16,45	0,040	240	200
19	18,25	0,036	300	250

Литые ножи немодифицированных плавков имеют повышенную хрупкость по сравнению с ножами плавков, модифицированных бором в виде ферробора, и поэтому показали сравнительно низкую стойкость. Указанная в таблицах 6—7 стойкость ножей немодифицированных плавков № 1 и 10 получена как средняя из наибольшего количества испытаний. Причем значительное число испытаний ножей этих плавков заканчивалось на первых проходах из-за выкрашивания режущей кромки, чего ни разу не наблюдалось при испытании ножей модифицированных плавков. Относительная стойкость литых ножей немодифицированных плавков по сравнению со стойкостью ножей из кованой стали равна примерно 50% при испытании литых ножей со специальной геометрией и 27,5% при испытании литых ножей с геометрией для ножей из кованой стали.

Лучшие плавки с оптимальной (или близкой к тому) добавкой бора при работе по вязкой стали с временным сопротивлением 61 кг/мм^2 имеют стойкость, равную примерно 170% от стойкости ножей из кованой стали при испытании литых ножей с специальной геометрией и около 90% от стойкости ножей из кованой стали при испытании литых ножей с геометрией, принятой для кованых ножей. Следует также отметить, что модифицирование бором в виде ферробора резко повышает стойкость литого инструмента из быстрорежущей стали различного химического состава. Это обстоятельство имеет исключительно важное значение при производстве литого инструмента из отходов быстрорежущей стали, в большинстве случаев состоящих из различных марок (как правило, из стали марки РФ-1 и ЭИ-262, трудно отличимых по искре). При переплавке отходов быстрорежущей стали практически очень трудно получить литую сталь определенного (оптимального) химического состава.

Как уже отмечалось, на заводе были проведены производственные испытания резанием литых ножей $23 \times 14 \times 6$, модифицированных бором в виде ферробора. Испытания проводились в инструментальном цехе на 3-стороннем фрезеровании по вязким сталям в одинаковых условиях с ножами из кованой стали. Производственные испытания в основном подтвердили результаты лабораторных испытаний.

Из всех испытанных в лаборатории резания завода ножей из плавков с добавкой бора в виде комплексного сплава высокую (но значительно меньшую, чем с добавкой бора в виде ферробора) стойкость имела только плавка № II с добавкой 0,0017% бора. Ножи всех остальных плавков с добавкой бора в виде комплексного сплава оказались хрупкими и показали низкую стойкость. Таким образом, установлено, что применение комплексного сплава с бором для модифицирования литой быстрорежущей стали менее целесообразно, чем применение ферробора.

4. Металлографический анализ плавов

Микроструктура литых ножей из быстрорежущей стали с различным содержанием вольфрама, отлитых в кокиль (модифицированных и немодифицированных), состоит из трех структурных составляющих—светлой составляющей, темной составляющей и сетки карбидной эвтектики. Исследование структуры немодифицированных плавов позволило сделать следующие выводы.

1. Структура немодифицированных плавов характеризуется относительно крупным зерном.

2. Объем, занимаемый сеткой карбидной эвтектики, возрастает с увеличением содержания вольфрама в стали. Сетка карбидной эвтектики тем грубее, чем больше содержание вольфрама в стали (при равном содержании углерода).

3. Количество темной составляющей возрастает с увеличением содержания вольфрама. При содержании вольфрама больше 14% (и углерода около 0,9%) темная составляющая распределяется в виде относительно грубой (черной) сетки в пределах каждого зерна, переходящей в центре зерна в сплошные участки, количество и величина которых увеличивается с дальнейшим увеличением содержания вольфрама. О том, что темная (черная) сетка внутри зерна является темной составляющей, свидетельствует резкое снижение микротвердости в местах скопления черной сетки и то обстоятельство, что сетка непосредственно переходит в сплошные участки темной составляющей в центре зерна.

Исследование структуры модифицированных плавов позволило заметить следующие закономерности.

1. Модифицирование бором в виде ферробора вызывает резкое уменьшение величины зерна литой быстрорежущей стали с различным содержанием вольфрама (примерно от 8% до 19% вольфрама) и способствует получению очень тонкой сетки карбидной эвтектики. Величина зерна уменьшается до определенной (оптимальной) концентрации бора и снова увеличивается при дальнейшем увеличении концентрации бора. Наибольшее измельчение структуры вызывает добавка бора в виде ферробора в количестве 0,015—0,025% бора.

2. В структуре плавов с большим содержанием вольфрама (до 19%), модифицированных бором, отсутствуют сплошные участки темной составляющей. Темная составляющая под влиянием добавки бора распределяется в пределах зерна в виде очень тонкой сетки (черной после травления 10% раствором азотной кислоты в этиловом спирте).

3. Объем, занимаемый сеткой карбидной эвтектики, возрастает под влиянием модифицирования бором, но значительно в меньшей степени, чем под влиянием увеличения содержания вольфрама в немодифицированной стали.

4. Добавка бора в виде комплексного сплава (в количестве 0,0017% бора) так же приводит к измельчению зерна и устраняет возможность образования сплошных участков темной составляющей, однако в этом случае достигается значительно меньший эффект, чем в случае добавки бора в виде ферробора.

5. Добавка больших количеств комплексного сплава с бором (больше 0,0017% бора или больше 0,125% сплава) приводит к образованию большого количества посторонних (неметаллических) включений, располагающихся по границам зерен, что вызывает повышенную хрупкость литого инструмента.

6. Судя по результатам испытаний резанием, наилучшие режущие свойства имеют плавки с мелким зерном, тонкой сеткой карбидной эвтектики и распределением темной составляющей (в пределах зерна) в виде очень тонкой (черной) сетки.

5. Измерение микротвердости

Измерение микротвердости структурных составляющих литой стали производилось на приборе ПМТ-3. Отпечатки измерялись при увеличении $\times 487$. Нагрузка на алмазную пирамиду составляла во всех случаях 20 грамм. В каждом образце делалось до двадцати измерений отдельной структурной составляющей и затем брались средние значения микротвердости. Перед измерением микротвердости образцы подвергались электрополировке. Во всех плавках удалось измерить только микротвердость светлой составляющей. Так как сплошные участки темной составляющей имела только немодифицированная плавка № 1, то микротвердость темной составляющей удалось измерить в одной этой плавке. Среднее значение микротвердости темной составляющей равно 450 кг/мм^2 . Так как темная составляющая имеет сравнительно низкую твердость (и прочность), то наличие крупных сплошных участков темной составляющей в структуре литой стали может отрицательно влиять на режущие свойства инструмента.

Также не во всех плавках удалось измерить микротвердость сетки карбидной эвтектики, особенно в модифицированных плавках, где было мало крупных скоплений эвтектики. Микротвердость эвтектики измерялась в местах ее скопления, где в микроскоп ясно были заметны как включения карбидов, так и включения аустенита (мартенита) в виде очень мелких чередующихся пластинок. В отпечаток алмазной пирамиды вписывалось большое количество и карбидных и аустенитных (мартенситных) включений. Нам удалось установить, что микротвердость эвтектики модифицированных плавков, особенно в литом состоянии (до отпуска) выше таковой немодифицированных плавков. После отпуска микротвердость эвтектики повышается значительно у немодифицированных плавков и менее значительно у модифицированных плавков. В то же время после отпуска микротвердость эвтектики модифицированных плавков ($1000\text{—}1100 \text{ кг/мм}^2$) остается более высокой, чем микротвердость эвтектики немодифицированных плавков ($800\text{—}1000 \text{ кг/мм}^2$). Это свидетельствует о том, что состав эвтектики модифицированных и немодифицированных плавков различен. Повидимому в эвтектике немодифицированных плавков больше аустенита (остаточного в литом состоянии) и меньше карбидов.

В таблицах 9—11 приведены средние значения микротвердости светлой составляющей плавков.

Таблица 9

Микротвердость светлой составляющей плавков с малым содержанием вольфрама

Обозначение плавков	2	3	4	5	6
Содержание бора в % по анализу	0,015	0,015	0,018	0,020	0,030
Микротвердость в литом состоянии	686	682	704	718	739
Микротвердость после 3-кратного отпуска	783	775	798	808	820

Таблица 10

Микротвердость светлой составляющей плавков с средним содержанием вольфрама

Обозначение плавков	10	13	14	15	16	17
Содержание бора в % по анализу	—	0,010	0,020	0,006	0,025	0,030
Микротвердость в литом состоянии	864	704	739	799	756	768
Микротвердость после 3-кратного отпуска	900	783	783	838	800	811

Таблица 11

Микротвердость светлой составляющей плавков с большим содержанием вольфрама

Обозначение плавков	1	12	18	19	7
Содержание бора в % по анализу	—	0,008	0,040	0,036	0,053
Микротвердость в литом состоянии . . .	800	756	783	756	840
Микротвердость после 3-кратного отпуска	863	811	838	783	866

Как видно из приведенных данных, микротвердость светлой составляющей в плавках, модифицированных бором, уменьшается до определенного (оптимального) содержания бора и снова увеличивается с дальнейшим увеличением содержания бора. Наибольшие значения микротвердости светлой составляющей имеют немодифицированные плавки. Микротвердость светлой составляющей во всех плавках снижается в местах скопления сетки темной составляющей. Наибольшее снижение микротвердости светлой составляющей в местах скопления сетки темной составляющей наблюдается в немодифицированных плавках, где сетка темной составляющей грубее (толще). Таким образом, в немодифицированных плавках ножей имеет место большая неоднородность в механических свойствах в пределах зерна. Высокая твердость светлой составляющей немодифицированных плавков вызывает (вместе с крупным зерном и грубой сеткой карбидной эвтектики) повышенную хрупкость ножей этих плавков при работе с ударной нагрузкой (фрезеровании).

В плавках, модифицированных бором (оптимальным или близким к тому количеством бора), нет резкого изменения твердости в пределах зерна (в связи с распределением темной составляющей в виде очень тонкой сетки и отсутствием сплошных участков темной составляющей). Микротвердость светлой составляющей модифицированных бором плавков значительно меньше таковой немодифицированных плавков и приближается к микротвердости мартенсита кованой стали, которая по данным Лебедева [1] равна примерно 680—700 единицам. Микротвердость сетки карбидной эвтектики модифицированных плавков выше таковой немодифицированных плавков, но в модифицированных плавках сетка карбидной эвтектики очень тонка. Все это приводит к тому, что ножи модифицированных бором плавков по сравнению с ножами немодифицированных плавков обладают повышенной вязкостью, поэтому не выкрашиваются при работе с ударной нагрузкой (при фрезеровании) и имеют высокую стойкость.

В плавках с добавкой бора в виде комплексного сплава, микротвердость структурных составляющих также изменяется (по сравнению с немодифицированными плавками), но это изменение выражено значительно менее резко, чем в плавках с добавкой бора в виде ферробора.

Из сравнения микротвердости светлой составляющей немодифицированных плавков № 10 и № 1 (см. табл. 10—11) с разным содержанием вольфрама (13,01% и 18,09%) можно заключить, что под влиянием увеличения в стали содержания вольфрама так же происходит снижение микротвердости светлой составляющей, но намного менее значительное, чем под влиянием модифицирования бором. Снижение микротвердости светлой составляющей объясняется уменьшением концентрации углерода в гамма-твердом растворе, часть которого переходит в состав карбидной фазы, увеличивая количество последней, так как микротвердость светлой составляющей под влиянием модифицирования бором снижается в значительно большей степени, чем под влиянием увеличения содержания вольфрама в литой немодифицированной стали, то отсюда следует, что под влиянием модифицирования, большее количество углерода из гамма-твердого раствора переходит в состав карбид-

ной фазы, чем под влиянием увеличения содержания в стали вольфрама; следовательно, и количество карбидной фазы должно возрасти в большей степени, о чем свидетельствует также повышение твердости карбидной эвтектики под влиянием модифицирования.

В то же время объем, занимаемый карбидной эвтектикой, как уже отмечалось, под влиянием модифицирования бором увеличивается в значительно меньшей степени, чем под влиянием увеличения содержания вольфрама в немодифицированной стали. Это можно объяснить только тем, что в составе карбидной фазы литой стали, модифицированной бором, находятся преимущественно карбиды хрома (Cr_7C_3), объем которых по данным Лебедева [2] в три раза меньше объема сложного карбида $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$. В составе же карбидной фазы литой немодифицированной стали находится преимущественно сложный карбид ($\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$), поэтому при меньшем количестве углерода, переходящего в состав карбидной фазы, объем карбидной фазы немодифицированной стали возрастает в большей степени.

Изменение микротвердости структурных составляющих литой стали (и изменение объема, занимаемого карбидной фазой) позволяет сделать вывод, что под влиянием модифицирования бором происходит перераспределение легирующих элементов между фазами литой быстрорежущей стали. Концентрация углерода и хрома в светлой составляющей уменьшается, а концентрация вольфрама увеличивается (за счет меньшего образования сложного карбида). Соответственно в карбидной фазе концентрация хрома и углерода увеличивается, а концентрация вольфрама уменьшается.

6. Выводы

1. Модифицирование бором до определенной (оптимальной) концентрации вызывает резкое уменьшение величины зерна литой быстрорежущей стали и способствует получению очень тонкой сетки карбидной эвтектики. Темная составляющая распределяется в пределах зерна в виде очень тонкой (черной) сетки.

2. Объем, занимаемый карбидной эвтектикой в литой модифицированной бором быстрорежущей стали, увеличивается по сравнению с таковым в немодифицированной быстрорежущей стали одного и того же химического состава. Увеличение содержания вольфрама в литой немодифицированной стали также приводит к увеличению объема карбидной эвтектики, но значительно более резко, чем в первом случае.

3. Под влиянием модифицирования бором происходит изменение микротвердости структурных составляющих литой быстрорежущей стали в литом и отпущенном состоянии. Микротвердость светлой составляющей уменьшается при увеличении добавки бора (в сталь одного и того же химического состава) до некоторой (оптимальной) концентрации и снова увеличивается с дальнейшим увеличением концентрации бора. Микротвердость светлой составляющей уменьшается также с увеличением содержания в стали вольфрама, но гораздо менее значительно, чем под влиянием модифицирования бором. Микротвердость карбидной эвтектики литой модифицированной быстрорежущей стали выше таковой немодифицированной быстрорежущей стали.

4. Микротвердость светлой составляющей немодифицированной литой быстрорежущей стали (около 900 кг/мм^2) намного выше микротвердости мартенсита кованной стали (около 700 единиц). В то же время в местах скопления грубой сетки темной составляющей, а также в местах сплошных участков темной составляющей, микротвердость резко снижается, так как микротвердость темной составляющей (450 кг/мм^2) немного ниже микротвердости мартенсита кованной стали. Высокая твердость светлой составляющей, а также наличие грубой (толстой) сетки карбидной эвтектики

вызывает повышенную хрупкость литого немодифицированного инструмента. Наличие грубой сетки темной составляющей (внутри зерна) и сплошных участков мягкой (и не прочной) темной составляющей так же снижает стойкость литого немодифицированного инструмента.

5. Микротвердость светлой составляющей модифицированной бором быстрорежущей стали ($750-800 \text{ кг/мм}^2$) приближается к микротвердости мартенсита кованной стали. Темная составляющая распределяется (в пределах каждого зерна) в виде очень тонкой сетки, в местах скопления которой микротвердость снижается незначительно. Большая однородность по твердости основной металлической массы, а также наличие очень тонкой сетки карбидной эвтектики обеспечивает повышенную вязкость литой модифицированной бором стали.

6. Данные об изменении микротвердости структурных составляющих и изменение объема, занимаемого карбидной фазой, позволяют сделать вывод, что модифицирование бором вызывает перераспределение легирующих элементов между фазами литой быстрорежущей стали. Концентрация углерода и хрома уменьшается в гамма-твердом растворе и увеличивается в карбидной фазе. Концентрация вольфрама в гамма-твердом растворе увеличивается, а в карбидной фазе уменьшается.

7. При испытании фрезерованием по вязкой стали с временным сопротивлением 61 кг/мм^2 литые ножи торцевых фрез немодифицированных плавов имели повышенную хрупкость. Были случаи выкрашивания режущей кромки в процессе работы.

8. Модифицирование бором повышает стойкость литых ножей в 3—4 раза по сравнению с средней стойкостью ножей немодифицированных плавов при работе в одинаковых условиях. В процессе испытания резанием не было ни одного случая выкрашивания режущей кромки ножей модифицированных (ферробором) плавов.

9. Модифицирование бором позволяет получить достаточно высокую стойкость литого инструмента из быстрорежущей стали с значительной разницей в химическом составе (в пределах от химического состава марки ЭИ-262 до химического состава стали марки РФ-1), поэтому модифицирование бором следует особенно рекомендовать при производстве литого инструмента из отходов быстрорежущей стали, когда возможна путаница в составе отходов (РФ-1 или ЭИ-262).

10. Оптимальная добавка бора в виде ферробора в литую быстрорежущую сталь с различным содержанием вольфрама находится в пределах 0,015—0,025% бора при условии раскисления стали алюминием из расчета присадки 0,09% алюминия.

11. Влияние добавки бора в виде комплексного сплава незначительно по сравнению с влиянием добавки бора в виде ферробора. Оптимальная добавка бора в виде комплексного сплава равна 0,0017% бора.

12. Стойкость литых ножей торцевых фрез значительно повышается при увеличении задних углов резания.

13. Модифицирование бором в виде ферробора и применение рациональной геометрии режущей части позволяет с успехом использовать литой инструмент на фрезерных работах по вязким сталям.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лебедев Т. А., Ревис И. А. Структура и свойства литого инструмента из быстрорежущей стали. Машгиз, 1949.

